

st. bryg. w stanie spocz. prof. dr hab. inż. Zoja BEDNAREK
st. kpt. dr inż. Tomasz DRZYMAŁA
Zakład Mechaniki Stosowanej, SGSP
Zakład Podstaw Budownictwa i Materiałów Budowlanych, SGSP

Analiza wyników badań modułu sprężystości fibrobetonu z dodatkiem włókien polipropylenowych w warunkach termicznych pożaru

W artykule przedstawiono procedury badawcze oraz wyniki badań modułu sprężystości fibrobetonu z dodatkiem włókien polipropylenowych poddanego oddziaływaniu wysokiej temperatury zbliżonej do temperatury występującej w środowisku pożaru. Oznaczenie modułu sprężystości wykonano na próbkach betonowych oraz fibrobetonowych klasy C30/37 i C60/75, zgodnie z procedurą „Oznaczenie współczynnika sprężystości betonu przy ściskaniu”. Przedstawiono analizę wyników badań spadku modułu sprężystości w wysokich temperaturach pożaru.

This paper presents research methods and studies results of the elastic modulus of fibers reinforced concrete with polypropylene fibers subject to high temperature, close to the temperatures occurring during the fire. The elastic modulus was determined for both concrete samples and fibers reinforced concrete samples of C30/37 and C60/75 class, according to the following procedure: “Determination of the concrete in compression elasticity modulus”. The analysis concerning results of studies showing a decrease the elastic modulus in fire high temperatures is presented.

Słowa kluczowe: pożar, fibrobeton, włókna polipropylenowe (PP), moduł sprężystości.

Keywords: fire, fibers reinforced concrete (FRC), polypropylene fibers, elastic modulus.

1. Wstęp

Wpływ wysokich temperatur występujących w czasie pożarów na wytrzymałość na ściskanie fibrobetonu autorzy omówili w poprzednim artykule [1]. W niniejszym artykule przedstawiono dalszy ciąg badań właściwości wytrzymałościowych fibrobetonu z dodatkiem włókien polipropylenowych, których dodanie do betonu zwiększa odporność konstrukcji betonowych w środowisku o zwiększonej wilgotności na zjawisko eksplozyjnego odpryskiwania (ang. *thermal spalling*) [2–8].

Badaniami prowadzonymi przez autorów w Zakładzie Mechaniki Stosowanej w Szkole Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie objęto trzy rodzaje włókien polipropylenowych (PP). Badania wytrzymałościowe dotyczyły betonów klasy C30/37 oraz C60/75 modyfikowanych dodatkiem włókien polipropylenowych (fibrobeton) oraz betonów klasy C30/37 oraz C60/75 bez dodatku włókien (beton kontrolny). W czasie badań dążono do tego, aby wzrost temperatury w piecu był zbliżony do warunków termicznych standardowego pożaru, które można przedstawić za pomocą znormalizowanej krzywej „temperatura – czas” obrazującej warunki termiczne w piecu badawczym przy ustalaniu odporności ogniowej elementów budowlanych metodą eksperymentalną [9, 10]. Po wygrzewaniu w piecu i stopniowym wystudzeniu w temperaturze otoczenia, próbki każdorazowo poddawano badaniom wytrzymałościowym – w tym przypadku celem było wyznaczenie modułu sprężystości.

W niniejszym artykule przedstawiono analizę wyników badań modułu sprężystości E_{cm} betonu oraz fibrobetonu z dodatkiem włókien polipropylenowych poddanego oddziaływaniu wysokiej temperatury zbliżonej do temperatury występującej w środowisku pożaru.

2. Procedury badawcze

2.1. Charakterystyka materiałów i próbek do badań

Przedstawione w artykule [1] wyniki badań wykazały nieznaczny wpływ rodzaju zastosowanych włókien na końcowe wyniki, dlatego w niniejszych badaniach do wykonania próbek z fibrobetonu zastosowano jako dodatek włókna polipropylenowe „F”, których charakterystykę przedstawiono w tabeli 1. Wykonano badania porównawcze na próbkach bez dodatku włókien polipropylenowych oraz z dodatkiem włókien o objętości $1,2 \text{ kg/m}^3$. Włókna dodawano do tworzyw cementowych w trakcie procesu mieszania, przy przedłużonym czasie mieszania w celu równomiernego rozproszenia włókien. Włókna te są odporne

na alkaliczne środowisko betonu (zaczynu), mają także wysoką odporność na działanie kwasów.

Tabela 1. Charakterystyka włókien polipropylenowych wykorzystanych do badań (wg danych producentów) [11]

Właściwość	Charakterystyka włókien polipropylenowych „F”
barwa	beżowa
charakterystyka	multifilamentowe
długość [mm]	19
średnica [μm]	35–40
gęstość [kg/dm^3]	0,91
wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	około 400
moduł sprężystości [MPa]	około 4900
temperatura mięknięcia [$^{\circ}\text{C}$]	około 150
d_{tex}^*	około 10

* d_{tex} – ciężar 10 000 m włókna wyrażony w gramach.

Włókna polipropylenowe „F” (rys. 1) są to fibrylowane, podwyższonej jakości wiązkowe włókna, stosowane jako „zbrojenie” strukturalne w betonie. Włókna „F”, jak podaje producent, są skutecznym rozwiązaniem przeciw skurczowi plastycznemu, zwiększają również odporność betonu na uderzenia. Włókna te zapobiegają sedymentacji składników mieszanki betonowej oraz podwyższają odporność betonu w konstrukcjach narażonych na działanie wód agresywnych. Stosowane: w prefabrykacji, do betonu natryskowego oraz w konstrukcjach narażonych na wysokie temperatury pożarowe.



Rys. 1. Włókna polipropylenowe „F”

Źródło: opracowanie własne.

Próbki do badań wykonano w formie walca o średnicy 100 mm i wysokości 200 mm. Do wykonania betonu klasy C30/37 użyto cementu CEM I 32,5 R z cementowni Ożarów, natomiast do betonu klasy C60/75 cementu CEM I 42,5 R z cementowni Małogoszcz. Cement zastosowany do badań spełniał, wg deklaracji producenta, wymagania normy PN-EN 197-1:2002 „Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku” [12]. Do wykonania betonu klasy C30/37 wykorzystano kruszywa składowe: piasek wiślany 0/2 mm oraz żwir „Jeziorki” 2/16 mm. Do betonu klasy C60/75 wykorzystano kruszywa składowe: piasek wiślany 0/2 mm, grys granitowy „Graniczna” 2/8 mm oraz grys granitowy 8/16 mm. Wskaźnik W/C betonu klasy C30/37 wynosił 0,358, natomiast w przypadku betonu klasy C60/75 był równy 0,318. Wykonanie próbek było zgodne z wymaganiami norm PN-EN 12390-2:2001 „Badania betonu. Część 2. Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych” [13]. Próbki przeznaczone do badań zostały przygotowane na zamówienie Zakładu Mechaniki Stosowanej Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w „Ośrodku Rzecznawstwa i Inżynierii Procesów Budowlanych Oddziału Warszawskiego PZliTB” przy udziale pracowników Laboratorium Instytutu Konstrukcji Budowlanych Politechniki Warszawskiej. Próbki wykonane zostały w specjalnych formach walcowych, wykonanych w Zakładzie Mechaniki Stosowanej SGSP. Szczegółowe dane dotyczące składu betonu zestawiono w tabelach 2 i 3 [11]. Wszystkie składniki betonu spełniały wymagania właściwych norm.

Tabela 2. Skład mieszanki betonowej betonu klasy C30/37

Składniki	Jednostka miary	Beton klasy C30/37
1	2	3
cement CEM I 32,5 R	[kg/m ³]	399
piasek wiślany 0/2 mm	[kg/m ³]	649
żwir „Jeziorki” 2/16 mm	[kg/m ³]	1281
plastyfikatory chrysofluid Ce40	% mc	1
woda	[dm ³]	143
W/C	–	0,358

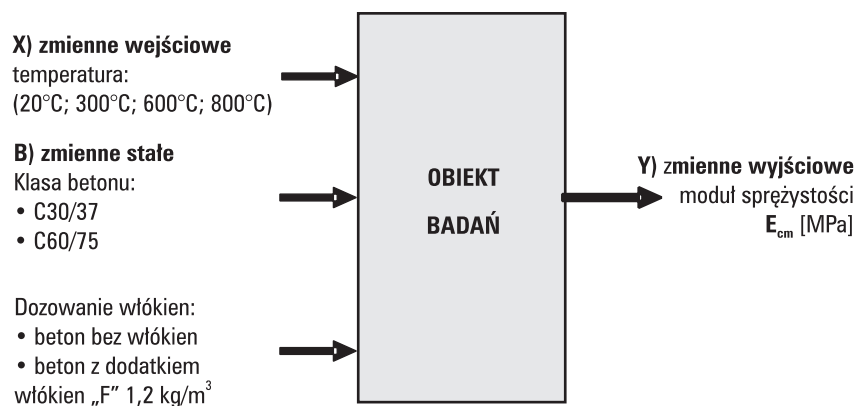
Tabela 3. Skład mieszanki betonowej betonu klasy 60/75

Składniki	Jednostka miary	Beton klasy C60/75
1	2	3
cement CEM I 42,5 R	[kg/m ³]	450
piasek wiślany 0/2 mm	[kg/m ³]	736
grys granitowy „Graniczna” 2/8 mm	[kg/m ³]	456
grys granitowy „Graniczna” 8/16 mm	[kg/m ³]	684
plastyfikatory chrysofluid CE40	% mc	1,7
woda	[dm ³]	143
W/C	–	0,318

Próbki do badań dojrzewały 28 dni w warunkach normowych, a następnie przez pół roku w warunkach laboratoryjnych. Po tym okresie zostały poddane badaniom zgodnie z programem badań opisanym w punkcie 2.2.

2.2. Program badań modułu sprężystości

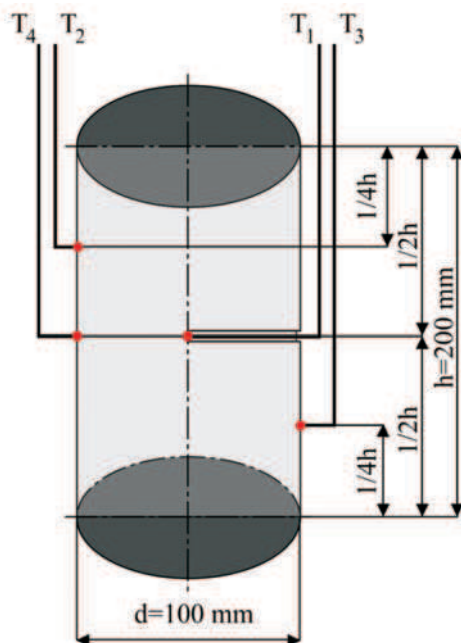
Oznaczenie modułu sprężystości E_{cm} wykonano na próbkach betonowych oraz fibrobetonowych klasy C30/37 (beton zwykły) oraz C60/75 (beton wysokiej wytrzymałości) zgodnie z procedurą „Oznaczenie współczynnika sprężystości betonu przy ściskaniu”. Metody badawcze we wspomnianej procedurze są zharmonizowane z normami [14] oraz [15], dotyczą oznaczania współczynnika sprężystości przy ściskaniu próbek z betonu wykonanych w formach. Współczynnik sprężystości (moduł Younga) określany jest jako tangens nachylenia siecznej do wykresu zależności naprężeń i odkształceń „ $\sigma - \varepsilon$ ” w zakresie naprężeń od 0,5 MPa do 1/3 wytrzymałości betonu na ściskanie f_{cm} . Charakterystyka materiałów oraz skład mieszanki betonowej odpowiadał założeniom badawczym opisanym w punkcie 2.1. Na rys. 2 przedstawiono program badań przy oznaczaniu modułu sprężystości.



Rys. 2. Program badań przy oznaczaniu modułu sprężystości

Źródło: opracowanie własne.

Proces wygrzewania próbek przebiegał według krzywej „standardowej” ISO 834 [9] oraz PN-EN 1991-1-2:2008 [10], obrazującej narastanie temperatury w trakcie standardowego pożaru. Następnie, po osiągnięciu założonej temperatury (300°C, 600°C, 800°C), próbki wygrzewano w piecu do momentu wyrównania temperatur na termoparach pomiarowych (T_1 , T_2 , T_3 , T_4) rozmieszczonych tak, jak pokazano na rys. 3. Prędkość nagrzewania w tym przypadku wynosi około 5–6°C/min.

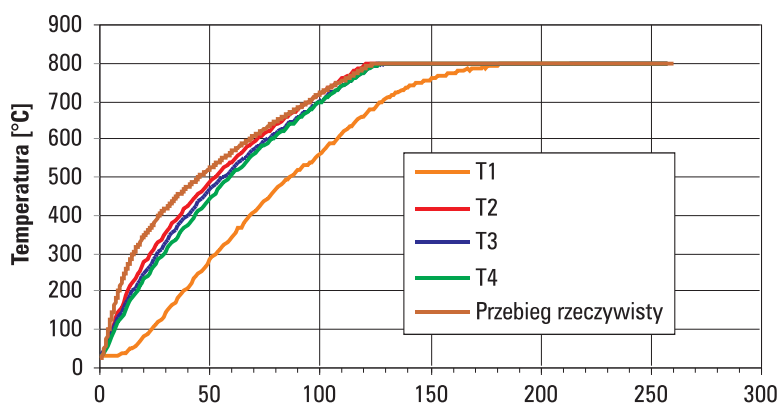


- T_1 – termopara wewnętrzna umieszczona w 1/2 wysokości na głębokości 50 mm,
 T_2 , T_3 – termopary zewnętrzne umieszczone w 1/4 wysokości od podstawy,
 T_4 – termopara zewnętrzna umieszczona w 1/2 wysokości od podstawy

Rys. 3. Widok próbki betonowej z rozmieszczonymi termoparami pomiarowymi

Źródło: opracowanie własne.

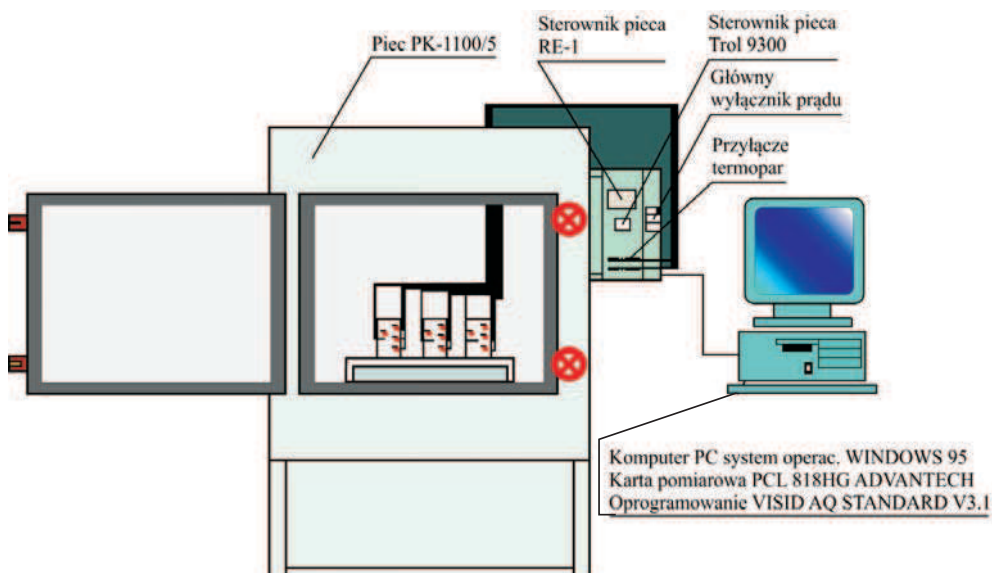
Na rys. 4 przedstawiono przykładowe rozkłady temperatur w piecu w miejscu rozmieszczenia termopar w temperaturze 800°C (na zewnątrz próbki – termopary zewnętrzne T_2 , T_3 , T_4 oraz wewnątrz próbki – termopara wewnętrzna T_1).



Rys. 4. Przebieg procesu nagrzewania w temperaturze 800°C

Źródło: opracowanie własne.

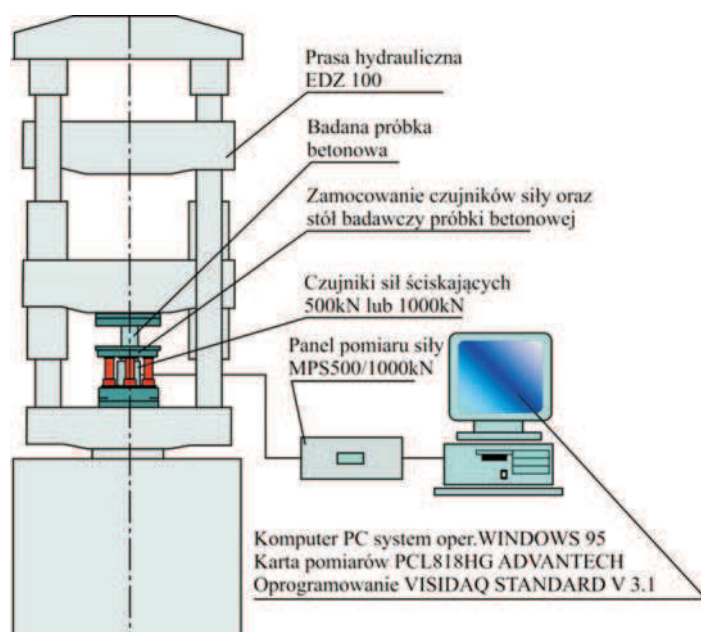
Wyrzewnianie próbek fibrobetonowych oraz betonowych przeprowadzono na stanowisku badawczym, którego zasadniczy trzon stanowi średniotemperaturowy elektryczny piec komorowy typu PK 1100/5 oraz komputer PC z odpowiednim oprogramowaniem do sterowania oraz rejestracji temperatury podczas wyrzewniania próbek (rys. 5).



Rys. 5. Średniotemperaturowy piec elektryczny typu PK 1100/5

Źródło: opracowanie własne.

Badania modułu sprężystości próbek betonowych i fibrobetonowych wykonano w Laboratorium Mechaniki Stosowanej SGSP. W skład stanowiska badawczego wchodzi maszyna hydrauliczna EDZ-100 ze specjalistycznym oprzyrządowaniem do badania modułu sprężystości. Stanowisko do badania modułu sprężystości z zamontowanymi na próbce czujnikami pomiarowymi przedstawiono na rys. 6 i 7.



Rys. 6. Schemat maszyny wytrzymałościowej EDZ-100 do badania wytrzymałości na ściskanie

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 7. Widok maszyny wytrzymałościowej z zamontowanymi na próbce czujnikami pomiarowymi do oznaczania modułu sprężystości

Źródło: opracowanie własne.

Po wygrzaniu w piecu i wystudzeniu, próbki każdorazowo poddawano badaniom oznaczenia współczynnika sprężystości przy ściskaniu zgodnie z procedurą badawczą. W każdym punkcie pomiarowym zbadano po pięć próbek.

4. Wyniki badań doświadczalnych

Zestawienie wyników badań wpływu temperatury wygrzewania na względną zmianę modułu sprężystości dla betonu C30/37 oraz C60/75 bez i z dodatkiem włókien polipropylenowych „F” o objętości $1,2 \text{ kg/m}^3$ przedstawiono w tabeli 4. W zestawieniu przyjęto za 100% moduł sprężystości betonu bez dodatku włókien polipropylenowych.

Tabela 4. Wyniki badań względnej zmiany modułu sprężystości w funkcji temperatury betonu C30/37 oraz C60/75 bez i z dodatkiem włókien polipropylenowych „F” o objętości $1,2 \text{ kg/m}^3$ (założenie: moduł sprężystości betonu bez włókien w temperaturze 20°C – 100%)

Beton (fibrobeton)	Moduł sprężystości E_{cm} [MPa]				
		20 [°C]	300 [°C]	600 [°C]	800 [°C]
C30/37	E_{cT} [MPa]	36 104,30	19 086,13	3990,84	899,69
	$E_{cT}/E_{c20^\circ\text{C}}$ [%]	100	52,86	11,05	2,49
	Spadek [%]	0	47,14	88,95	97,51
C30/37 z $1,2 \text{ kg/m}^3$ F	E_{cT} [MPa]	36 504,25	23 668,58	4133,56	2166,38
	$E_{cT}/E_{c20^\circ\text{C}}$ [%]	101,11	65,56	11,45	6,00
	Spadek [%]	1,11	34,44	88,55	94,00
C60/75	E_{cT} [MPa]	40 925,68	27 668,58	4569,76	2514,81
	$E_{cT}/E_{c20^\circ\text{C}}$ [%]	100	67,61	11,17	6,14
	Spadek [%]	0	32,39	88,83	93,86
C60/75 z $1,2 \text{ kg/m}^3$ F	E_{cT} [MPa]	40 234,02	28 808,21	4974,24	2729,27
	$E_{cT}/E_{c20^\circ\text{C}}$ [%]	98,31	70,39	12,15	6,67
	Spadek [%]	1,69	29,61	87,85	93,33

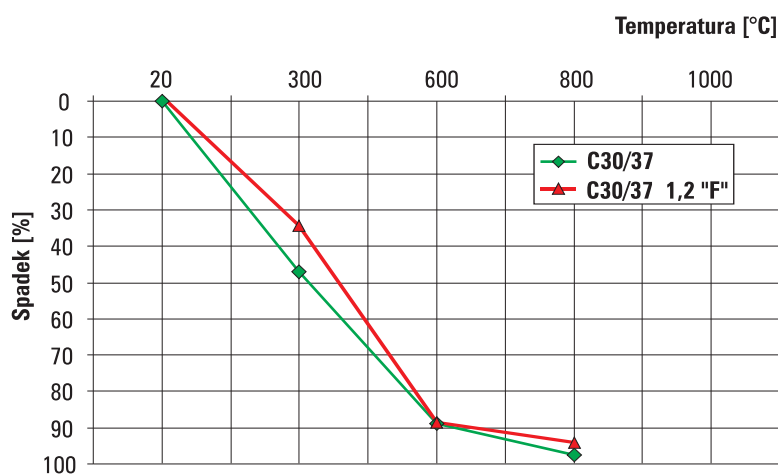
Źródło: opracowanie własne.

Uwaga

$E_{c20^{\circ}\text{C}}$ – moduł sprężystości betonu bez dodatku włókien polipropylenowych w temperaturze 20°C ,

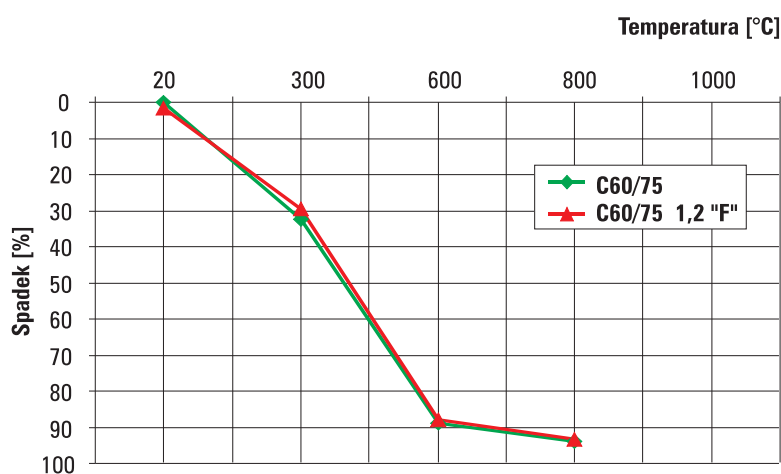
E_{cT} – wyniki średnie modułu sprężystości uzyskane z pięciu prób w badanej temperaturze.

Na rys. 8 i 9 przedstawiono spadek modułu sprężystości badanych betonów bez i z dodatkiem włókien polipropylenowych „F” ze wzrostem temperatury w porównaniu do betonu bez włókien.



Rys. 8. Spadek modułu sprężystości fibrobetonu z dodatkiem włókien polipropylenowych „F” w stosunku do betonu klasy C30/37, w zależności od temperatury

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 9. Spadek modułu sprężystości fibrobetonu z dodatkiem włókien polipropylenowych „F” w stosunku do betonu klasy C60/75, w zależności od temperatury

Źródło: opracowanie własne.

Spadek modułu sprężystości betonu C30/37 oraz C60/75 bez i z dodatkiem włókien polipropylenowych „F” ze wzrostem temperatury, w porównaniu do wartości tegoż modułu w temperaturze 20°C zamieszczono w tabeli 5.

Wyniki zmian względnej wytrzymałości na ściskanie otrzymano jako stosunek wytrzymałości na ściskanie próbek wygrzewanych do wytrzymałości próbek niewygrzewanych $E_{cT}/E_{c20^{\circ}\text{C}}$ [%].

Tabela 5. Wyniki badań względnej zmiany modułu sprężystości w funkcji temperatury betonu C30/37 oraz C60/75 bez i z dodatkiem włókien polipropylenowych „F” o objętości 1,2 kg/m³ (w porównaniu do modułu sprężystości w temperaturze 20°C)

Beton (fibrobeton)	Moduł sprężystości E_{cm} [MPa]				
		20 [°C]	300 [°C]	600 [°C]	800 [°C]
C30/37	E_{cT} [MPa]	36 104,30	19 086,13	3990,84	899,69
	$E_{cT}/E_{c20^{\circ}\text{C}}$ [%]	100	52,86	11,05	2,49
	Spadek [%]	0	47,14	88,95	97,51
C30/37 z 1,2 kg/m ³ F	E_{cT} [MPa]	36 504,25	23 668,58	4133,56	2166,38
	$E_{cT}/E_{c20^{\circ}\text{C}}$ [%]	100	64,84	11,32	5,93
	Spadek [%]	0	35,16	88,68	94,07
C60/75	E_{cT} [MPa]	40 925,68	27 668,58	4569,76	2514,81
	$E_{cT}/E_{c20^{\circ}\text{C}}$ [%]	100	67,61	11,17	6,14
	Spadek [%]	0	32,39	88,83	93,86
C60/75 z 1,2 kg/m ³ F	E_{cT} [MPa]	40 234,02	28 808,21	4974,24	2729,27
	$E_{cT}/E_{c20^{\circ}\text{C}}$ [%]	100	71,6	12,36	6,78
	Spadek [%]	0	28,4	87,64	93,22

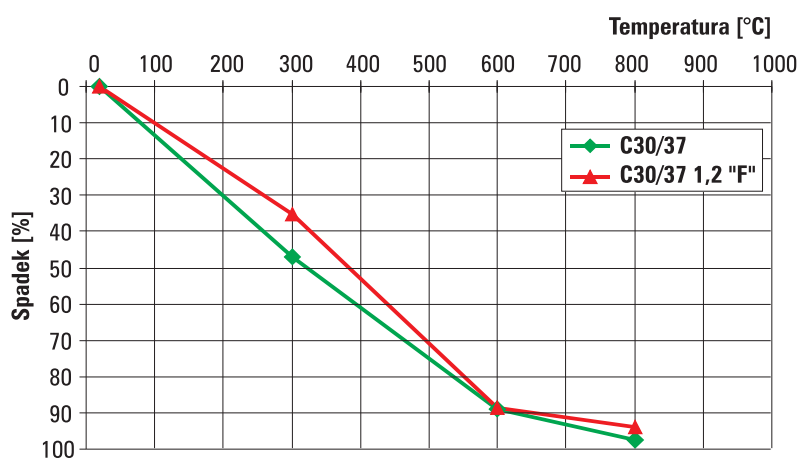
Źródło: opracowanie własne.

Uwaga

$E_{c20^{\circ}\text{C}}$ – moduł sprężystości badanego betonu lub fibrobetonu z dodatkiem włókien polipropylenowych w temperaturze 20°C,

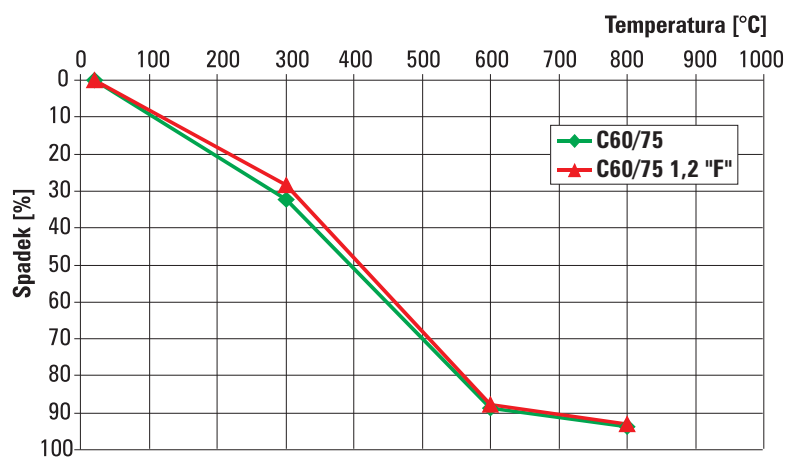
E_{cT} – wyniki średnie modułu sprężystości uzyskane z 5 prób w badanej temperaturze.

Na rys. 10 i 11 przedstawiono zmianę względnej wartości modułu sprężystości badanych betonów C30/37 oraz C60/75 bez i z dodatkiem włókien polipropylenowych („F”) ze wzrostem temperatury w porównaniu do betonu bez włókien.



Rys. 10. Wpływ temperatury wygrzewania na względną wartość modułu sprężystości betonu klasy C30/37 bez i z dodatkiem włókien polipropylenowych („F”)

Źródło: opracowanie własne.



Rys.11. Wpływ temperatury wygrzewania na względną wartość modułu sprężystości, betonu klasy C60/75 bez i z dodatkiem włókien polipropylenowych („F”)

Źródło: opracowanie własne.

5. Wnioski z przeprowadzonych badań

Na podstawie uzyskanych wyników sformułowano następujące wnioski:

1. Moduł sprężystości betonu z dodatkiem włókien polipropylenowych w temperaturze normalnej (ok. 20°C) pozostaje praktycznie bez zmian w porównaniu z betonem bez dodatku włókien.
2. Moduł sprężystości betonu klasy C30/37 oraz C60/75 z dodatkiem włókien polipropylenowych „F” o objętości do 1,2 kg/m³ w temperaturach wysokich

ma tendencję do niewielkiego wzrostu w porównaniu do betonów bez dodatku włókien.

3. Można przyjąć, że dodatek do betonu klasy C60/75 oraz C30/37 włókien polipropylenowych „F” o objętości $1,2 \text{ kg/m}^3$ nie wpłynął na spadek modułu sprężystości.
4. Szczególnie korzystny wpływ dodatku włókien polipropylenowych „F” zaobserwowano po wygrzewaniu próbek w temperaturze 300°C . Wyniki modułu sprężystości zarówno w przypadku betonu C30/37, jak i betonu C60/75 z dodatkiem włókien „F” o objętości $1,2 \text{ kg/m}^3$ osiągają nieco wyższe wartości.

Piśmiennictwo

- [1] Bednarek Z., Drzymała T.: Wpływ temperatur występujących podczas pożaru na wytrzymałość na ściskanie fibrobetonu, *Zeszyty Naukowe SGSP* 2008, nr 36.
- [2] Drzymała T., Bednarek Z.: Wybrane kierunki zastosowań fibrobetonu z dodatkiem włókien polipropylenowych poddanego oddziaływaniu wysokiej temperatury, *Logistyka* 2011, nr 6.
- [3] Gawin D., Pasavento F., Majorana C.E., Schrefler B.A.: Modelling of degradation process of concrete structures at high temperature with application to tunnel fires, XXI Konferencja Naukowo-Techniczna „Awaryjne Budowlane”, Szczecin – Międzyzdroje 2003.
- [4] Gawin D., Witek A., Pasavento F., Schrefler B.A.: Efficacy of various methods used for protection of concrete structures against thermal spalling in fire conditions, V Międzynarodowa Konferencja „Bezpieczeństwo Pożarowe Budowli”, Warszawa-Miedzeszyn 2005.
- [5] Gawin D., Witek A., Pasavento F.: O ochronie betonowej obudowy tunelu przed zniszczeniem w warunkach pożarowych – wyniki projektu UPTUN, *Inżynieria i Budownictwo* 2006, nr 11.
- [6] Kalifa P., Menneteau F.D., Ouenard D.: *Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures*, *Cem. and Conc. Res.* 2000, 30 (2000) s. 1915–1927.
- [7] Kalifa P., Chene G., Galle C.: High-temperature behavior of HPC with polypropylene fibers from spalling to microstructure, *Cem. Concr. Res.* 31 (2001), s. 1487–1499.
- [8] Min Li, Zhishen Wu, Wei Sun, Chunxiang Qian: Badania i analiza mechanizmu zapobiegającego odpryskom w betonie o wysokiej wytrzymałości za pomocą włókien polipropylenowych, *CWB* 2011, nr 3.
- [9] ISO 834. Fire resistance tests elements of building construction, International Standard, Geneva 1985.

- [10] PN-EN 1991-1-2:2008. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1–2: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru.
- [11] Praca naukowo-badawcza: Wpływ temperatur występujących podczas pożaru na wybrane parametry wytrzymałościowe fibrobetonu, S/E-422/8/2007/2008, I i II Etap, kierownik naukowy Z. Bednarek, Główny wykonawca pracy T. Drzymała, SGSP, Warszawa 2008.
- [12] PN-EN 197-1:2002. Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- [13] PN-EN 12390-2:2001. Badania betonu. Część 2. Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych.
- [14] PN-EN 13286-43:2005. Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym. Część 43: Metoda oznaczania modułu sprężystości mieszanek związanych spoiwem hydraulicznym.
- [15] ISO 6784:1982. Concrete-Determination of static modulus of elasticity in compression.

Summary

Zoja *BEDNAREK*
Tomasz *DRZYMAŁA*

Analysis of the Elastic Modulus Tests Results of Fibers Reinforced Concrete with Polypropylene Fibers Subject to High Temperature

This paper presents research methods and studies results of the elastic modulus of fibers reinforced concrete with polypropylene fibers subject to high temperature, close to the temperatures occurring during the fire. The elastic modulus was determined for both concrete samples and fibers reinforced concrete samples of C30/37 and C60/75 class, according to the following procedure: "Determination of the concrete in compression elasticity modulus".